

発振器周波数測定ガイドライン

1	はじめに.....	2
2	周波数測定一般的な課題.....	2
2.1	異なる周波数カウンタで測定した結果の不一致.....	2
2.2	信号品質による周波数カウンタの大きな誤差.....	3
2.3	ゲート時間が異なる周波数カウンタの結果の不一致.....	3
2.4	オシロスコープで測定した周波数の大きなバラツキ.....	3
3	基準発信器の選び方.....	4
4	周波数カウンタを用いた測定.....	4
5	デジタル・オシロスコープを使用した測定.....	7
5.1	オシロスコープの時間精度と量子化ノイズ.....	7
5.2	信号周期の測定.....	8
5.3	ゲート時間とタイムベースの制約.....	8
6	信号のプローブ.....	8
7	参考資料.....	11
	Appendix A. ダイレクト・カウント方式.....	12

1 はじめに

すべてのデジタルデバイスには基準クロックが必要であり、発振器はその目的のため広く使用されます。高性能デバイスの周波数特性の検証には正確な周波数測定が必要です。本アプリケーションノートでは、様々な周波数測定法や機器の概要について記載し、SiTime の MEMS 発振器ユーザーの正確な周波数測定に役立てて頂く事を目的としています。

2 周波数測定の一般的な課題

2.1 異なる周波数カウンタで測定した結果の不一致

異なる周波数カウンタによる測定結果の不一致は、下記に示す理由のいずれか、またはその組み合わせによって生じる場合があります。

- 1) **2種類の機器が異なる基準信号を使用している場合**：周波数カウンタの基本モデルは、廉価な TCXO を使った内部基準発振器がよく使われます。その周波数安定性は 1~5ppm、経年劣化率は 2~3ppm/年程度となります。基準発振器から得られる基準信号に周波数誤差が含まれると、周波数カウンタの測定結果にその誤差が反映されてしまいます。図 1 は同じ周波数カウンタを使いながら、基準発振器のソースを内蔵 TCXO 基準にした時と、高精度な外付けルビジウム基準に切り換えた場合の測定結果を比較したものです。基準発振器を選ぶ際のガイドラインは 3 章を参照して下さい。

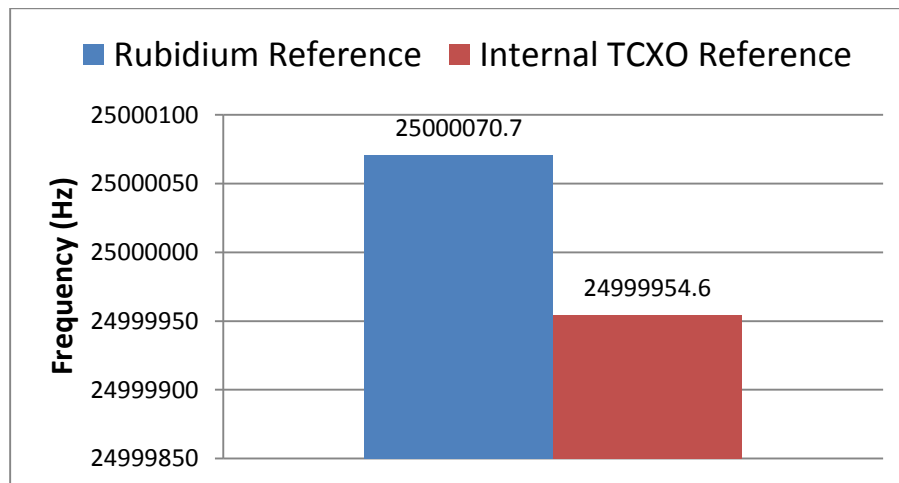


Figure 1: Frequency measurement results of a SiT8208 25 MHz oscillator using an Agilent 53132A frequency counter synchronized to an internal TCXO reference and to an external rubidium reference. Gate time 1s. The difference between the measurement results is 4.6 ppm.

- 2) **ゲート時間や測定機の仕様が異なる場合**：周波数カウンタ内で測定する入力信号と基準発振器からの信号とを比較する時間をゲート時間と呼び、分解能や測定時間に影響を与えます。測定機器間で異なるゲート時間に設定している場合、同じ基準信号を使っても異なる結果が得られる場合があります。また、基準信号やゲート時間が同じだったとしても、分解能の設定が異なれば短いゲート時間で結果に不一致が生じるかもしれません。詳細については 4 章を参照して下さい。

2.2 信号品質による周波数カウンタの大きな誤差

信号品質が不十分な場合、周波数カウンタの測定結果が意図せず増加、倍増してしまう事さえあります。これらは大抵、プローブを使って信号を取り込む場合に見受けられ、測定機入力が高インピーダンスモード（例えば 1M Ω ）に設定されています。周波数測定への信号品質の影響や、推奨されるプローブ方法については 6 章で説明します。

2.3 ゲート時間が異なる周波数カウンタの結果の不一致

周波数カウンタの測定誤差はゲート時間に反比例します。図 4 に示すように、ゲート時間が短くなるほど誤差は大きくなります。周波数カウンタの詳細については、4 章を参照して下さい。

2.4 オシロスコープで測定した周波数の大きなバラツキ

オシロスコープは、入力信号の 1 周期分のデータごとに周波数を測定しますが、測定値の処理方法は設定や機種によって異なります。1 回のキャプチャーに含まれる全周期に渡って平均化する場合もあれば、キャプチャーを繰り返して平均化する事もあります。5 章で説明しますが、1 周期分のデータから求めた周波数は周期ジッタやスコープの内部ノイズの影響を受けるため、数 1,000ppm 程度のバラツキが生じてしまいます。数 1,000 回分の周期データを取得して平均化すれば大きく誤差を減らせますが、それでも周波数カウンタを使えば簡単に得られる ppm レベルの精度には到達しません。ハイエンドオシロスコープを使った周波数測定の例を図 2 に示します。

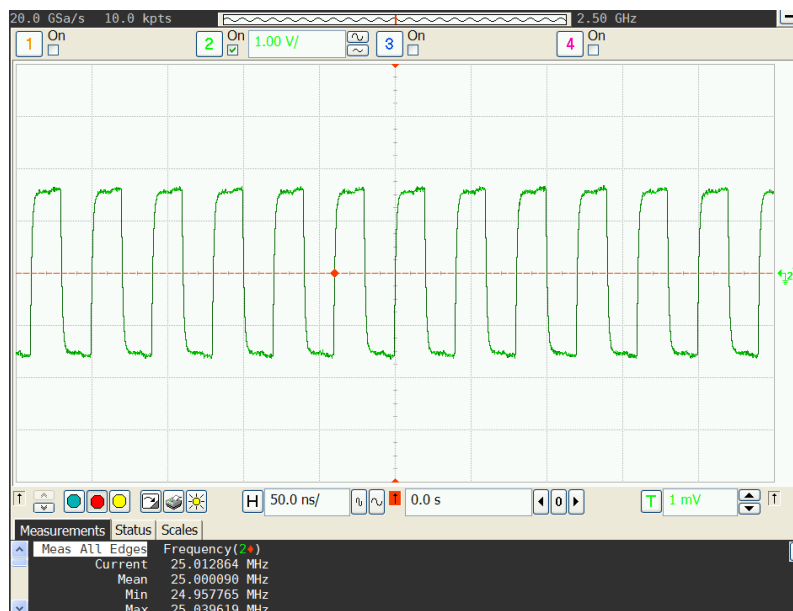


Figure 2: Example of a frequency measurement using an Agilent DSA90604A oscilloscope

3 基準発信器の選び方

測定とは、既知の基準と比較する事で未知の数量を調べる作業と言えます。周波数測定では、この基準にあたるのがタイムベースとなります。タイムベースの精度が不十分であれば、本来の周波数測定値に測定系の不完全性に起因するシステムティック誤差が付加されてしまいます。結果として生じる誤差は、タイムベースの不正確さ (δf_{TB}) と測定誤差 (δf_{Meas}) の和であり、 $\delta f = \delta f_{TB} + \delta f_{Meas}$ となります。測定を始める前には、必要な精度を持ったタイムベースを正しく選択しなければなりません^[1]。一般的なタイムベースの信号源と精度を表1に示します。

Table 1 Typical time base options

Time base type	Time base stability	Requires calibration
TCXO	> 1 ppm	Yes
OCXO	0.1 to 1 ppm	Yes
High-end OCXO	0.01 to 0.1 ppm	Yes
Rubidium	1 part-per-billion (ppb)	Yes
GPS-disciplined	0.01 ppb	No

GPS 同期タイムベースには、他のタイムベースに勝るいくつかの利点があります。

- 全ての遠隔地で同じタイムベースを使用できるため、周波数測定で高い相関を得る事ができる。
- 較正の必要が無い。

GPS 同期タイムベースの使用は、高精度な測定や高い相関を得るために推奨されます。ルビジウムタイムベースもほとんどの用途で使用可能です。GPS 同期タイムベースを除いて、全てのタイムベースは較正作業が必要となります。

4 周波数カウンタを用いた測定

周波数カウンタは正確な周波数を測定するように設計されており、選択するのに望ましい機器です。初期の周波数カウンタはハードウェアだけで容易に構成できるダイレクト・カウント方式を採用していましたが、測定分解能がゲート時間に固定され、測定誤差が入力周波数に依存する欠点がありました (Appendix 参照)。

最近の周波数カウンタは、レシプロカル・カウント方式を用いています^[2]。この方式では入力信号をゲート時間に同期させて基準発信器の周波数を測定します。そのため、測定分解能は基準発信器の周波数と測定時間によって変化し、入力周波数には影響を受けません。基準クロックの周波数を高くする事で分解能は向上しますが、クロック 1 周期以下の短い時間を補間する事で更に高い分解能が得られます (図 3 を参照の事)。これは、入力信号のスタートパルスから基準クロックの最初のパルスまでの時間間隔 T_a

と、入力信号のストップパルスから基準クロックの最初のパルスまでの時間間隔 t_B をアナログ補間器によって拡大する事で求められます。最新機種では 20ps 以下の分解能を実現しています^[3]。

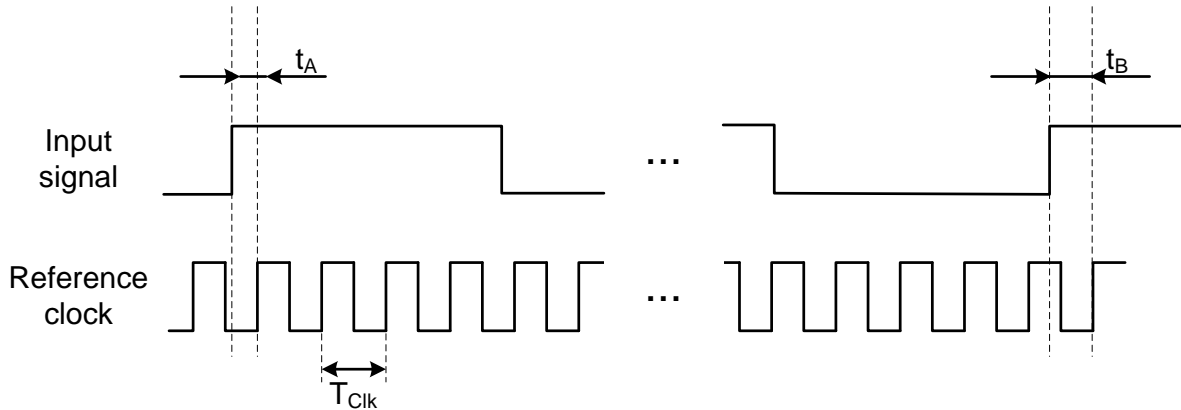


Figure 3: Reciprocal frequency measurement with time stamping capability

相対周波数測定誤差 $\delta f = \Delta f / f$ は、 $\delta f = \delta f_{TB} + \Delta T_{Int} / T_{Gate}$ として表されます。

ここで、 δf_{TB} はタイムベース誤差、 ΔT_{Int} はタスタートパルスとストップパルスのタイミング精度に起因するタイムインターバル測定誤差です。

$\Delta T_{Int} / T_{Gate}$ はタイミング精度による相対誤差を示し、入力周波数に対しては広範囲にわたり一定ですが、ゲート時間が短くなるに従い増加します^[1]。図 4 はゲート時間によって周波数測定誤差がどのように変化するかを、タイムインターバル測定誤差が異なる 2 台の周波数カウンタを使って示しています。この図ではタイムベース時間の誤差を考慮しておらず、実際にはこの誤差がオフセット分として追加されます。

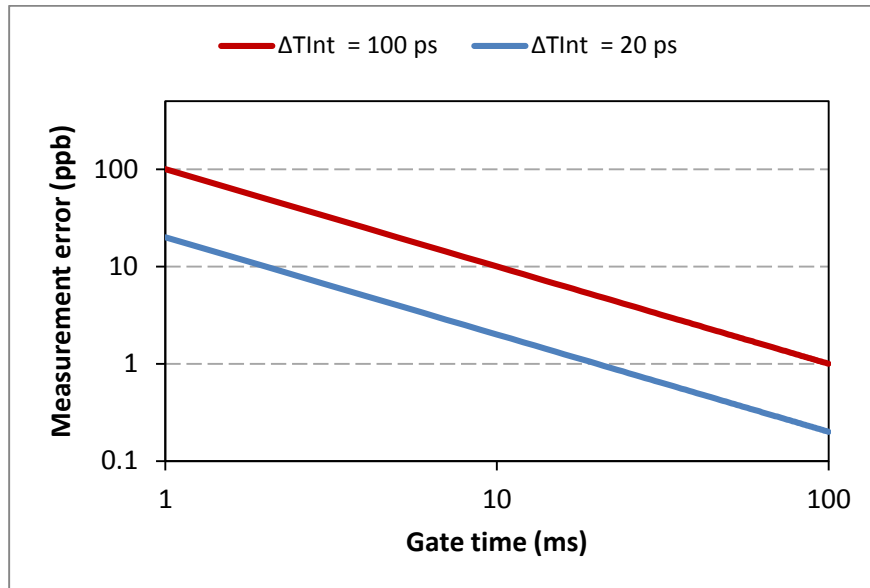


Figure 4: Frequency measurement error (ppb) versus gate time. Two time interval measurement accuracies represent different frequency counters. The plot assumes perfect time base.

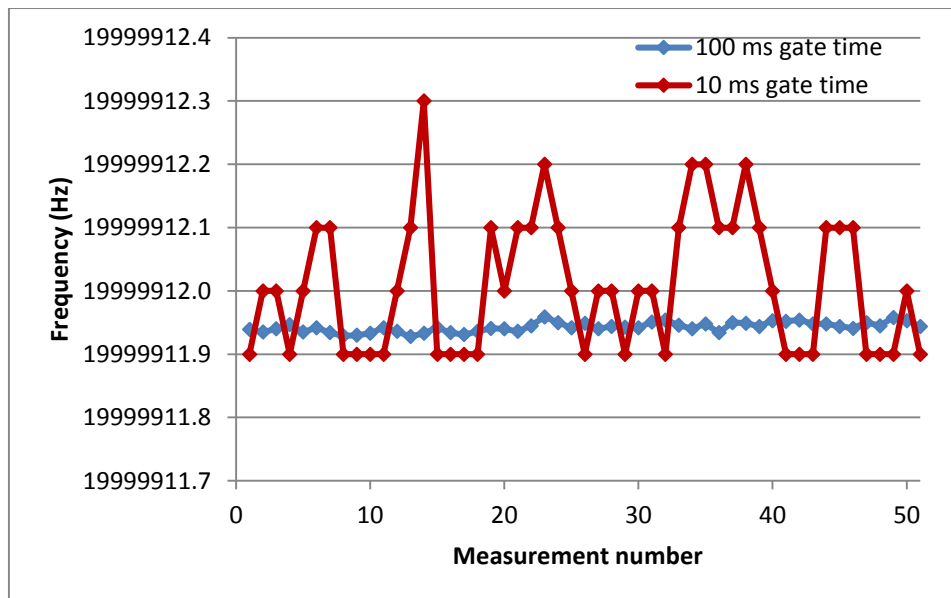


Figure 5: Frequency measurement results for various gate times; 50 samples per gate time. The input signal is a 20-MHz sine wave from an Agilent 33250A function generator; the frequency counter is an Agilent 53132A synchronized to a rubidium reference.

図 5 は、ゲート時間を 100ms から 10ms まで短くすることによって 20MHz の入力信号に対する分解能を 5ppb (0.1Hz) に制限する測定データを示しています。

注：機種によってはゲート時間内に追加測定を行い精度を向上させる機能を持つものもあります。例として Keysight 社 (旧 Agilent 社) 製 53132A や 53230A があげられます。そのため、ゲート時間に関連した測定誤差 ($\Delta T_{Int} / T_{Gate}$) は、すべての機種に当てはまる訳ではありません。

周波数測定誤差は下記の 2 つの要因が大部分を占めます。

1. タイムベースの精度と安定性
2. ゲート時間に対するタイムインターバル測定誤差

高精度なタイムベースを搭載した高分解能な機種を選択し、十分なゲート時間を掛ければ測定精度は改善します。SiTime はゲート時間を 100ms 以上に設定し、タイムベースとして GPS 同期カルビジウム基準を使用する事を推奨します。お手持ちの機種の精度と分解能について詳細を知りたい場合は、付属のマニュアルを参照下さい。

正確なタイムベースを使用することを条件として、より高い分解能の周波数カウンタを選択し、ゲート時間を増やすことにより、測定精度がより正確になります。SiTime は、100ms 以上のゲート時間および GPS 補正またはルビジウムタイムベースを用いることを推奨します。周波数カウンタの精度と分解能の詳細については、機器のマニュアルを参照してください。

注：32kHz 発振器の周波数測定については追加の推奨方法があります。www.sitime.com のアプリケーションノートの項を参照下さい。

5 デジタル・オシロスコープを使用した測定

オシロスコープは、クロック信号のパラメータ測定に広く使われます。この章では、周波数測定の有効性を制限するデジタル・オシロスコープの制約について説明します。

5.1 オシロスコープの時間精度と量子化ノイズ

デジタル・オシロスコープは、内蔵されたアナログ・デジタル・コンバーターから得られた一定の時間間隔で測定されたデータを収集して、アナログ入力をデジタル信号へ変換します。周波数を測定する際には、通常振幅の 50% のレベルで交差する箇所をトリガーし、2 点間を内挿して正確な時間を検出します。1 点目は交差する直前で、2 点目は交差した直後となります (図 6 を参照の事)。この時の測定時間の精度は、スコープが持つ内蔵時計の精度と量子化ノイズに依存します。時刻精度は t_1 と t_2 で、量子化ノイズは V_1 と V_2 で定義されます。時間測定における量子化ノイズの影響につきましては、SiTime のアプリケーションノート『AN10007 クロックジッタの定義と測定方法』^[4] の 4 章に細かく書かれていますので参照して下さい。

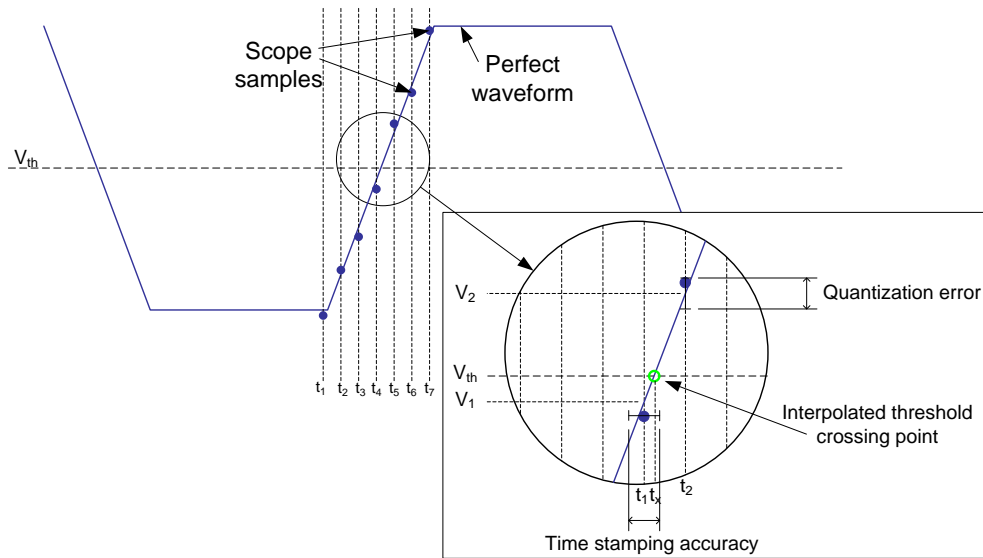


Figure 6: Impact of the oscilloscope quantization noise on timing measurements

5.2 信号周期の測定

多くのオシロスコープは、波形をキャプチャーする際に 1 クロック分の周期しか測定できません。相対誤差はかなり大きく、また、入力信号の周波数に応じて増加してしまいます。信号には高周波の周期ジッタが必ず含まれており、これらも大きな誤差の要因となります。キャプチャーと平均化を何回も繰り返す事で測定限界まで誤差を減らす事ができますが、時間が掛かる上に ppm レベルの精度に達する事はありません。

5.3 ゲート時間とタイムベースの制約

最新の高性能デジタル・オシロスコープは、キャプチャーした波形に含まれる全ての周期を測定する機能を内蔵しており、時間精度も優れています。しかし、メモリ容量の制限のため、最大サンプリングレートでは僅かな時間（通常は 1ms まで）しか捕捉できません。これは実質的に最大ゲート時間としての制約となり、結果的に測定精度を制限してしまいます。また、オシロスコープのタイムベースは主に低ジッタを目的としており、周波数安定性はあまり良くありません。ただし、外部からリファレンスクロックを貰う事で改善可能です。

6 信号のプロープ

信号品質は、何周期に渡って平均化を繰り返した場合でも、周波数測定に影響を与えるかもしれません。立ち上がりや立ち下がりの際に信号品質の劣化によりトリガーレベルを余計に横切ってしまうと、繰り返しの回数が多く記録される事があります（図 7 参照）。これはダブルトリガーと呼ばれ、見かけ上の周波数よりも高く測定されてしまいます。

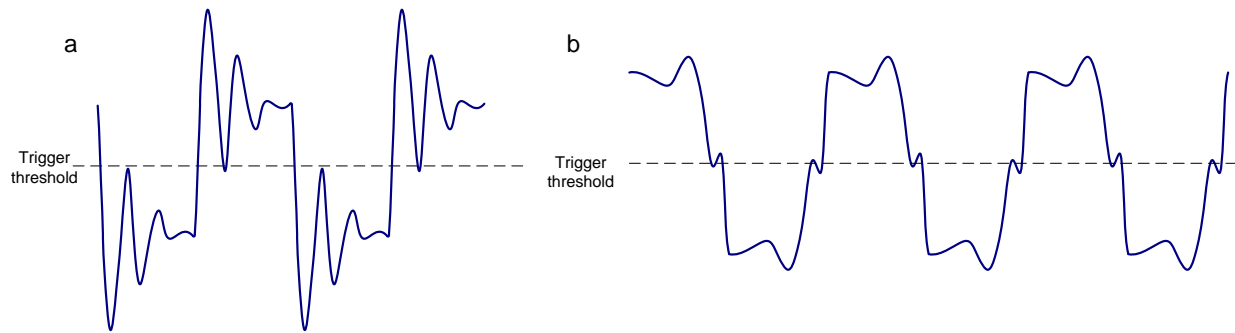


Figure 7: Two types of signal integrity issues that may cause double triggering: a) excessive ringing, over- and undershoots; b) reflection at the rising and/or falling edge of the waveform.

図 8 は、終端されていない長い引き回しをされたハイ・インピーダンス・プローブを使った事による信号品質の劣化を示しています。画面上に見られるリングング波形は深刻なレベルにあり、ダブルトリガーを引き起こす恐れがあります。

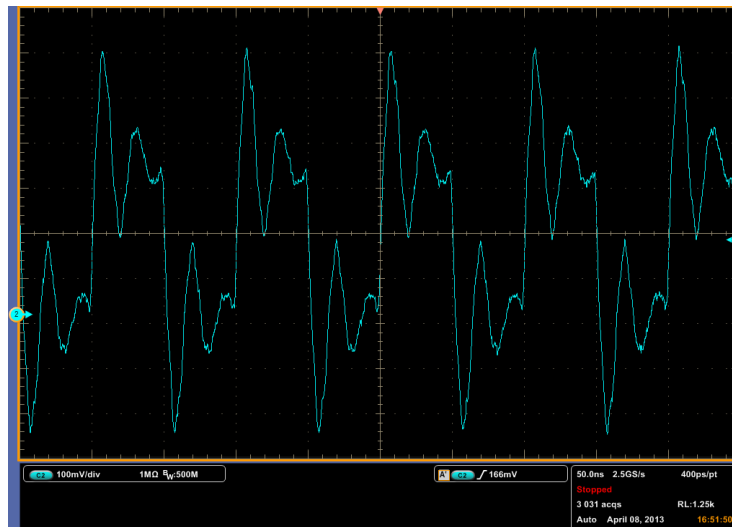


Figure 8: Long wires connected to a 10 MΩ passive probe used for accessing signal under test. Oscilloscope screen capture made with a Tektronix DPO7104.

不適切なプローブ方法は信号品質に悪影響を与え、ダブルトリガーを引き起こす恐れがあります。この状態では、周波数は実際の値より高く測定され、ばらつきも大きくなる事があります。

良好な信号品質を確保するには、信号源や負荷、伝送路のインピーダンス整合を取らなければならない、そのためには信号源や負荷の終端を正しく取る技術が必要になります。下記の例では、50 Ω の同軸ケーブルと様々な終端方法を使ったプローブ方法を示しています。

図 9 は、ソースを終端し装置側を 1MΩ で終端した場合の信号波形を示しています。この例では、DUT の出力インピーダンスが 25~30 Ω なので、50 Ω の同軸ケーブルとインピーダンス整合を取るために 20 Ω の抵抗を出力に対して直列に挿入しています。伝送路を伝播する信号波は測定機の高抵抗入力端で反射してしまいます。この反射波は信号源の終端で減衰しますがオーバーシュートとアンダーシュートが残ります。反射は除去が難しいので、この方法は推奨できません。

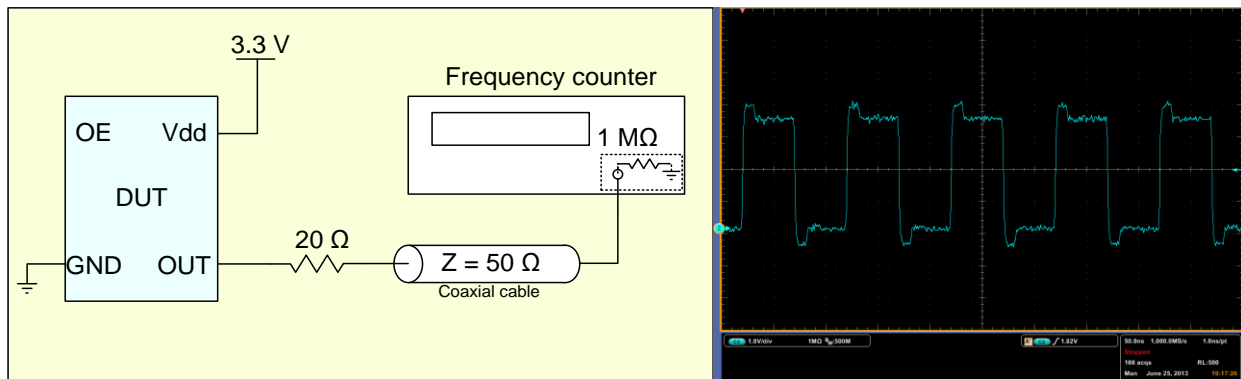


Figure 9: Waveform observed at the instrument side when the coaxial cable is connected to 1 MΩ instrument input and only the source termination at the DUT side is present

信号源と周波数カウンタを接続するより好ましい方法を図 10 に示します。装置の入力は 50 Ω 終端によって良好な信号品質が得られ、1kΩ の抵抗が DUT を外部負荷から分離します。このプローブ方法は 21:1 の減衰比を持ちます。プローブ方法につきましては、SiTime のアプリケーションノート『AN10028 発信器出力のプローブ方法』^[5]に細かく書かれていますので参照して下さい。

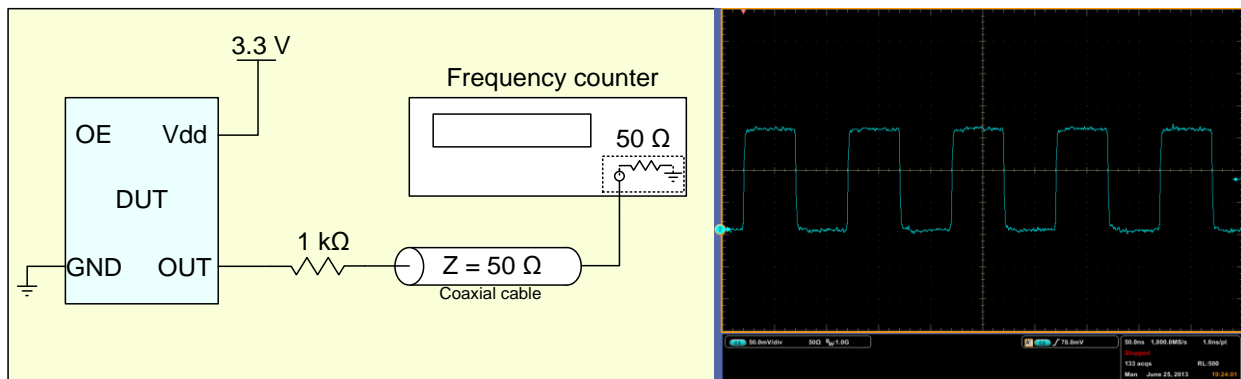


Figure 10: Recommended probing configuration for frequency measurement to ensure good signal integrity and only 1 kΩ signal under test loading

7 參考資料

[1] Agilent Technologies. Application note, "10 Hints for Getting the Most from Your Frequency Counter" (<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-8431EN.pdf>) (2008).

[2] Agilent Technologies. Application note 200, "Fundamentals of the Electronic Counters" (<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5965-7660E.pdf>) (1997).

[3] Agilent Technologies. Product datasheet 5990-6283EN, "Agilent 53200A Series RF/Universal Frequency Counter/Timers" (<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5990-6283EN.pdf>) (2013).

[4] SiTime Corp. Application note 10007, "Clock Jitter and Measurement" (<http://www.sitime.com/support2/documents/AN10007-Jitter-and-measurement.pdf>) (2013).

[5] SiTime Corp. Application note 10028, "Probing Oscillator Output" (<http://www.sitime.com/support2/documents/AN10028-Probing-Oscillator-Output-Rev1.0.pdf>) (2013).

Appendix A. ダイレクト・カウント方式

図 A.1 は、ダイレクト・カウント方式のブロックダイアグラムを示しています。入力信号は最初にコンディショニングされ、カウンタの内部回路に適したパルス信号となります。その後 AND ゲートの片方へ供給されます。もう片方の入力にはゲートを開閉する信号が入力され、タイムベース発信器と設定を変更できる分周器によって制御されます。ゲートをオープンしてからクローズするまでの時間をゲート時間 (T_{Gate}) と呼びます。パルスがハイレベルにある間、入力信号は AND ゲートを通過し、立ち上がりエッジをカウントレジスタで積算します。このようにして所定の時間内 T_{Gate} に見合った入力信号のサイクル数 N が得られます。入力周波数は、カウントしたサイクル数を時間間隔で割って、 $F = N/T_{Gate}$ として計算できます。

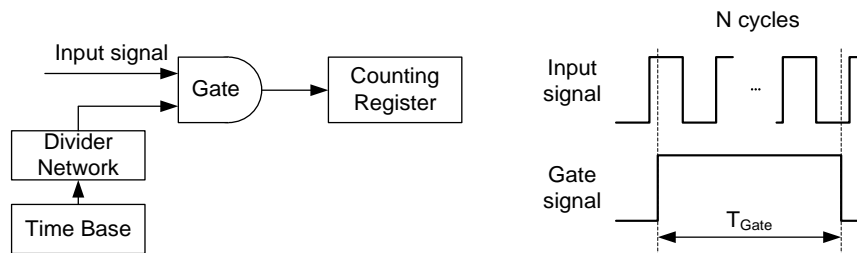


Figure A.1: Simplified block diagram of a direct digital gate frequency counter

ゲート時間は入力信号と非同期となるため、ゲートの開閉は入力信号の 1 サイクル内の途中で起きる事もあります。サイクル数 N は整数のみ取れるためあいまいさは ± 1 カウントとなり、入力信号の絶対誤差は ± 1 カウントをゲート時間で割った $\Delta F = \pm 1/T_{Gate}$ となります。

ここで実際の入力周波数を F とすると、相対周波数測定誤差は、 $\delta F = \Delta F / F \cdot 1e6$ と表され、その n 単位は ppm となります。図 A.2 はこの方式の分解能がゲート時間と入力周波数にどのように依存するかを示しています。

タイムベース安定性が 0.1ppm でゲート時間が 100ms のダイレクト・カウント方式を想定した場合、25MHz 入力信号の周波数測定誤差がいくらになるか計算してみましょう。周波数測定誤差は、 $\Delta F = 1/T_{Gate} = 1/0.1 = 10\text{Hz}$ であり、ppm で表すと $\delta F = 10/25e6 \cdot 1e6 = 0.4\text{ppm}$ となります。全測定誤差はタイムベース誤差と方式による誤差の足し合わせとなるため、 $0.1\text{ppm} + 0.4\text{ppm} = 0.5\text{ppm}$ となります。

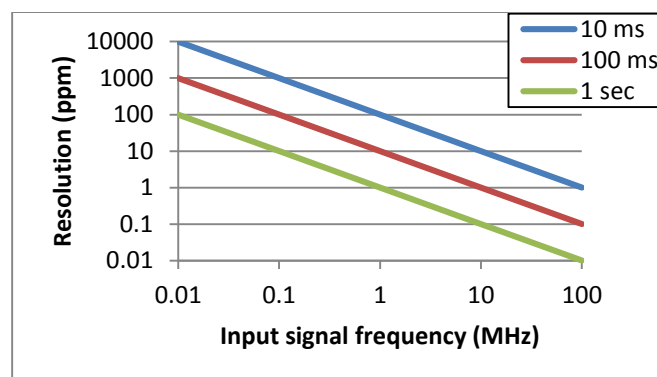


Figure A.2: Measurement resolution over input signal frequency for different gate times

SiTime Corporation
990 Almanor Avenue
Sunnyvale, CA 94085
USA
Phone: 408-328-4400
<http://www.sitime.com>

© SiTime Corporation, 2008-2013. The information contained herein is subject to change at any time without notice. SiTime assumes no responsibility or liability for any loss, damage or defect of a Product which is caused in whole or in part by (i) use of any circuitry other than circuitry embodied in a SiTime product, (ii) misuse or abuse including static discharge, neglect or accident, (iii) unauthorized modification or repairs which have been soldered or altered during assembly and are not capable of being tested by SiTime under its normal test conditions, or (iv) improper installation, storage, handling, warehousing or transportation, or (v) being subjected to unusual physical, thermal, or electrical stress.

Disclaimer: SiTime makes no warranty of any kind, express or implied, with regard to this material, and specifically disclaims any and all express or implied warranties, either in fact or by operation of law, statutory or otherwise, including the implied warranties of merchantability and fitness for use or a particular purpose, and any implied warranty arising from course of dealing or usage of trade, as well as any common-law duties relating to accuracy or lack of negligence, with respect to this material, any SiTime product and



any product documentation. Products sold by SiTime are not suitable or intended to be used in a life support application or component, to operate nuclear facilities, or in other mission critical applications where human life may be involved or at stake.